

INFLUENCIA DE LA TOPOGRAFÍA EN LA ESTACIONALIDAD DE LA ACTIVIDAD VEGETAL: ANÁLISIS EN EL PIRINEO OCCIDENTAL ARAGONÉS A PARTIR DE IMÁGENES NOAA-AVHRR

Teodoro Lasanta*, Sergio M. Vicente-Serrano y Alfredo Romo*****

*Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Campus de Aula Dei.

**Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza.

***Laboratorio de Teledetección. Departamento de Física Aplicada I. Facultad de Ciencias. Universidad de Valladolid

RESUMEN

Se estudia con imágenes de satélite la influencia de la topografía en la estacionalidad de la cubierta vegetal en el Pirineo central español. El análisis se realiza mediante la combinación de variables topográficas (elevación, radiación incidente, pendiente y curvatura) y los valores medios y coeficientes de variación estacionales del índice de vegetación normalizado (NDVI). Los resultados indican que se producen significativas diferencias estacionales en la influencia de las variables topográficas sobre la actividad vegetal y que los contrastes son también reseñables en función de los distintos usos del suelo. Conocer estos aspectos es interesante para la determinación de las áreas más adecuadas para posibles repoblaciones forestales, para la puesta en marcha de planes de recuperación agrícola o para establecer itinerarios ganaderos en el aprovechamiento de pastos y matorrales.

Palabras clave: Topografía, NDVI, variabilidad vegetal, estacionalidad vegetal, cubiertas del suelo, elevación, radiación solar, Pirineo.

Fecha de recepción: enero 2004

Fecha de admisión: julio 2004

ABSTRACT

The influence of topography on seasonally of vegetation cover is analysed in the central Spanish Pyrenees using remote sensing techniques. The analysis is carried out linking information of different topographic variables (elevation, incident solar radiation, slope and curvature) and the seasonal averages and variation coefficients of normalized difference vegetation Index (NDVI). The results indicate that there are seasonal differences in the influence of topographic variables on vegetation activity. Moreover, the different land-uses affect the relationships between topography and NDVI. The knowledge of these aspects is needed to determine the more suitable areas for reforestation, agricultural management and for establishing livestock itineraries for the grazing of pasture and shrubland areas.

Key words: Topography, NDVI, Vegetal variability, Vegetal seasonality, Land covers, Elevation, solar radiation, Pyrenees.

I. INTRODUCCIÓN

La actividad de las comunidades vegetales está condicionada, entre otros factores, por las variaciones climáticas, fundamentalmente las de carácter anual: ciclos térmicos y pluviométricos que conforman estaciones frías y/o secas (paro biológico y escasa actividad vegetal) y cálidas y/o húmedas (mayor actividad fisiológica y transferencia radiativa planta-atmósfera).

En las montañas mediterráneas, especialmente, la variabilidad climática origina contrastados paisajes vegetales entre las estaciones del año, ya que cuentan con gran diversidad de comunidades y cubiertas vegetales que responden con distintos ciclos fenológicos anuales a condiciones climáticas estacionales (Walter, 1979). También es necesario considerar los contrastes topográficos, causa de los microambientes topoclimáticos y el incremento de la diversidad y complejidad vegetal. La topografía condiciona las comunidades y especies vegetales que se instalan en cada espacio, sus posibilidades de aprovechamiento (García-Ruiz, 1988), su densidad y cobertura (Florinsky y Kuryakova, 1996; González Hidalgo, 1992) y su evolución a lo largo del tiempo (Vicente Serrano *et al.*, 2003).

Múltiples trabajos analizan la distribución de la vegetación en función de las características climáticas del medio (Tucker *et al.*, 1985; Kennedy, 1989). También son frecuentes los análisis que determinan la dinámica y respuesta vegetal a partir de la evolución climática a distintas escalas temporales (Schultz y Halpert, 1995; Yang *et al.*, 1998) y estacionales (Townshend y Justice, 1986; Duchemin *et al.*, 1999). La mayor parte de la bibliografía señala relaciones, en ocasiones muy estrechas, entre las características y evolución del clima con la distribución y dinámica vegetal: Fang *et al.*, (2001) y Paruelo y Lauenroth (1998), entre otros, ponen de relieve la íntima vinculación de la variabilidad vegetal interanual a los contrastes pluviométricos, con relaciones diferenciadas en las distintas cubiertas del suelo. Nicholson *et al.*, (1990) y Nicholson y Farrar (1994) indican la respuesta directa del crecimiento vegetal a los aportes totales de precipitación.

Menor atención se le ha prestado a la influencia que ejerce la topografía en la distribución y dinámica de la vegetación, pese a su interés científico y aplicado. Se trata de factores cons-

tantes en el tiempo a escala humana, al contrario de lo que sucede con la incertidumbre y variabilidad de los elementos climáticos. En este sentido, conocer la respuesta de la vegetación en función de la topografía puede ser una herramienta de gestión interesante, ayudando —por ejemplo— en la determinación de las áreas más adecuadas para posibles repoblaciones forestales, para la puesta en marcha de planes de recuperación agrícola o para establecer itinerarios ganaderos que optimicen el aprovechamiento de pastos y matorrales. En este trabajo se estudia, con apoyo de imágenes de satélite, la influencia del relieve (elevación, pendiente, curvatura y exposición) en la actividad vegetal de forma estacional.

II. ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo se ha realizado en la cuenca alta del río Aragón, en el Pirineo central español (Figura 1). La superficie de la cuenca es de 1772 km², con un amplio rango de altitudes, de 2.886 m s.n.m. en el Pico Collarada a menos de 500 m s.n.m. en el embalse de Yesa, en la salida de la cuenca. El relieve y la litología se organizan en bandas paralelas que siguen una dirección NW – SE (Soler y Puigdefábregas, 1972). En la parte septentrional se localiza el Pirineo Axial de litología paleozoica (calizas, esquistos y arcillas). Inmediatamente al sur están las Sierras Interiores (de calizas y areniscas), donde se alcanzan las mayores altitudes de la cuenca, superando en los picos más elevados (Collarada, Aspes, Sierra Bernera,...) los 2500 m s.n.m. A continuación aparece una amplia banda que corresponde al flysch eoceno, de relieve alomado, laderas de pendientes moderadas (entre el 20 y el 50% de desnivel) y altitudes comprendidas entre 800 y 2200 m (García-Ruiz y Puigdefábregas, 1982). El sector más meridional corresponde a la Depresión Interior, de litología margosa, suaves pendientes (inferiores al 20%) y altitudes entre 500 y 900 m s.n.m.

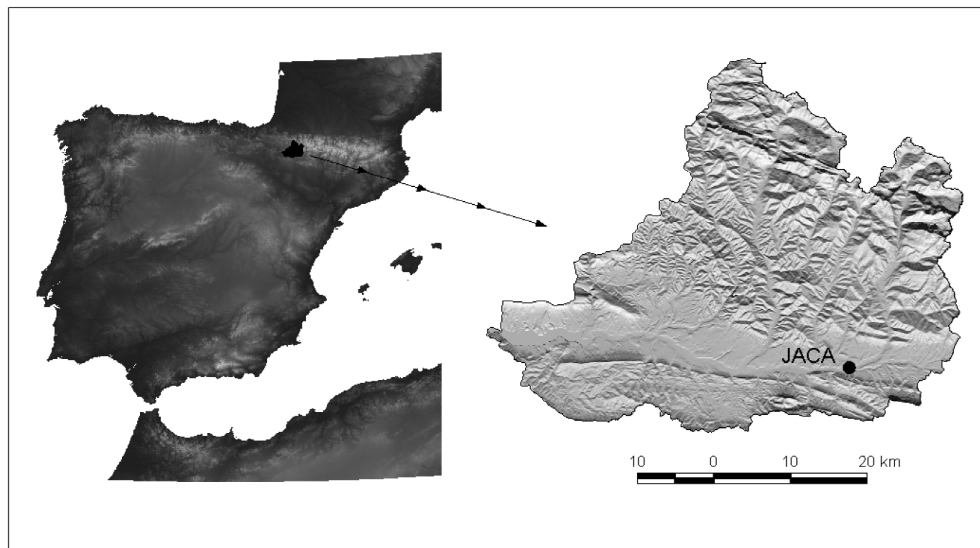


Figura 1. Área de estudio.

La cuenca tiene un clima de transición entre las influencias atlánticas (norte y oeste) y mediterráneas (sur y este). En la Depresión Interior las precipitaciones son de 800 mm/año, incrementándose en el resto de la cuenca; por encima de los 1.500 m de altitud superan los 1.500 mm. La variabilidad intranual es muy alta. La estación húmeda se extiende de octubre a junio, con un máximo primaveral y otro secundario en otoño. La temperatura media es de 12 °C en la Depresión Interior. Durante la estación fría (de noviembre a abril) la isoterma de 0 °C se sitúa a 1.549 m s.n.m. (García-Ruiz *et al.*, 1985).

La vegetación natural escasea como consecuencia de la intensa actividad humana que llevó a sustituir los bosques por campos y pastos para el ganado. La gestión tradicional se basó durante siglos en el aprovechamiento integral de los recursos para garantizar la alimentación de la población, en una economía de casi autoabastecimiento con escasos intercambios con el exterior, y de un censo ovino muy elevado. Este hecho implicó importantes transformaciones en el espacio natural (Lasanta, 1989; Montserrat, 1992; García-Ruiz y Valero, 1998). Actualmente, en el piso montano las comunidades dominantes son matorrales de erizón (*Echinopartum horridum*) (Montserrat *et al.*, 1984) y pinares secos de pino albar (*Pinus sylvestris*) como consecuencia del proceso de colonización de los antiguos campos de cultivo tras su abandono (Lasanta *et al.*, 2000) y de las repoblaciones forestales realizadas en las décadas de 1950 y 1960 (Chauvelier, 1987). En este piso también encontramos bosques submediterráneos naturales de quejigos (*Quercus faginea* ssp. *valentina*). Por encima de los mismos y hasta el piso subalpino se desarrollan los pinares mesófilos de pino albar, excepto en las áreas más occidentales, de mayor influencia atlántica, donde encontramos un piso montano húmedo de hayedos (*Fagus sylvatica*) y de abetales (*Abies alba*) con haya. En el piso subalpino se encuentran pinares de *Pinus uncinata*, aunque predominan los pastizales subalpinos creados históricamente por el hombre para alimentar el ganado en verano (Montserrat, 1992; Ferrer, 1988). En los sectores septentrionales más elevados aparecen comunidades vegetales del piso alpino, predominantemente de pastos rasos y densos conformados por especies resistentes a una innivación prolongada (Montserrat, 1971). En definitiva, la diversidad topográfica y la gestión humana tradicional y actual hacen que el área de estudio presente una notable variedad vegetal.

III. METODOLOGÍA

Se ha utilizado la serie de imágenes del satélite NOAA que abarca el periodo 1993-2000¹. Esta serie ha sido generada en el Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Vallado-

¹ El análisis podría plantearse a dos escalas de trabajo distintas, condicionadas por la resolución espacial de las imágenes de satélite disponibles. Imágenes de elevada resolución espacial (p. ej. Landsat ETM+ o SPOT) permiten un análisis detallado de la distribución espacial de los recursos naturales (30 m o menos). Sin embargo, estas imágenes tienen una baja frecuencia temporal que limita, dada la elevada cubierta nubosa que suele cubrir estos espacios, la posibilidad de disponer de un número adecuado de imágenes para determinar la producción vegetal en los distintos espacios. La variabilidad climática interanual puede hacer poco representativos los resultados generales obtenidos a partir de una o dos imágenes de satélite de una estación concreta. Este problema se soluciona utilizando imágenes de satélite de alta frecuencia temporal, con las que se puede disponer de registros en todos los meses durante varios años y obtener promedios fiables para calcular la variabilidad de los diferentes espacios. El problema de estas imágenes radica en su baja resolución espacial (generalmente 1 km), lo que imposibilita realizar estudios detallados. En este trabajo se ha optado, dada la extensión del área analizada y los objetivos perseguidos, por utilizar imágenes de baja resolución espacial y alta frecuencia temporal.

lid (LATUV), donde las imágenes se reciben diariamente, son corregidas atmosférica y geométricamente (Illera *et al.*, 1995) y se realiza un proceso de eliminación de la cubierta nubosa (Delgado, 1991). Mediante la utilización de los canales 1 (rojo) y 2 (infrarrojo cercano) se calcula diariamente el índice de vegetación normalizado $[NDVI = (\text{Canal } 2 - \text{Canal } 1) / (\text{Canal } 2 + \text{Canal } 1)]$, un parámetro que mide tanto la actividad como la producción de biomasa de las comunidades vegetales (Carlson y Ripley, 1997; Diallo *et al.*, 1991 y Wylie *et al.*, 2002).

A partir del valor máximo de las series diarias de NDVI se construyeron compuestos mensuales, de tal forma que se obtuvo una imagen de cada mes en el periodo 1993-2000 (Holben, 1986). Aquellos píxeles de las imágenes mensuales en las que en 4 o más años se registró cubierta nival se reclasificaron a 0 en el mes correspondiente, considerándose áreas sin actividad vegetal durante ese mes. Dicha información se georreferenció y se introdujo en un Sistema de Información Geográfica para calcular promedios y coeficientes de variación de cada uno de los meses del año. Considerando que la estación invernal la forman los meses de diciembre, enero y febrero, y así sucesivamente el resto de las estaciones, se seleccionó el mes central como representativo de cada una de las estaciones. No se utilizaron promedios estacionales para evitar que las diferencias mensuales de cubierta nival durante la estación invernal y primaveral alteraran los promedios en amplias áreas. De esta forma se obtuvieron cuatro imágenes promedio de NDVI de enero (invierno), abril (primavera), julio (verano) y octubre (otoño), así como cuatro imágenes de coeficiente de variación en los mismos meses. Estas imágenes están constituidas por 1772 píxeles (celdas de 1 x 1 km) de información continua, representando tanto el valor de NDVI promedio estacional como su coeficiente de variación.

A partir de un modelo digital de elevaciones de toda la cuenca, generado en el SIG ArcInfo (V 7.02), se obtuvieron, los mapas de pendientes, curvaturas y radiación solar incidente media diaria, para lo que se utilizó el SIG Miramon (Pons, 1998). Para calcular la radiación solar se siguió el método planteado por Pons (1997). Para hacer comparables las escalas espaciales de análisis entre la información vegetal, extraída a partir de las imágenes de satélite, y las cartografías de variables topográficas (escala 1: 50.000), se degradaron estas últimas a la misma resolución que la información disponible en las imágenes de satélite (1 km²) mediante el promedio de los valores de las variables en los píxeles de 50 m. En la figura 2 se muestra la distribución espacial de las variables topográficas en la cuenca del río Aragón a una resolución espacial de 1 km.

Para determinar la influencia de los factores topográficos en la actividad estacional y variabilidad temporal de la vegetación se utilizó un mapa digital de cubiertas del suelo a escala 1:200.000 (CHE, 2002), que se ha reclasificado a 8 categorías: 1- Cultivos de secano, 2- Cultivos de regadío, 3- Bosques de frondosas, 4- Coníferas, 5- Bosques mixtos, 6- Matorral, 7- Pastos supraforestales y 8- Roca sin cobertura vegetal. Esta cartografía se rasterizó y se convirtió al mismo tamaño de celda (1 x 1 km) que la información extraída de las imágenes de satélite (Figura 3). Dado que se trata de información categórica y más detallada que las cartografías de NDVI, se asignó el valor de cada píxel a la cobertura que presentaba mayor superficie en cada caso.

Se realizaron análisis de correlación entre las variables topográficas y los valores de los NDVIs, para lo que se empleó un coeficiente no paramétrico (Rho-Spearman), al no precisar datos normalizados, verse poco afectado por la presencia de extremos, y teniendo en cuenta

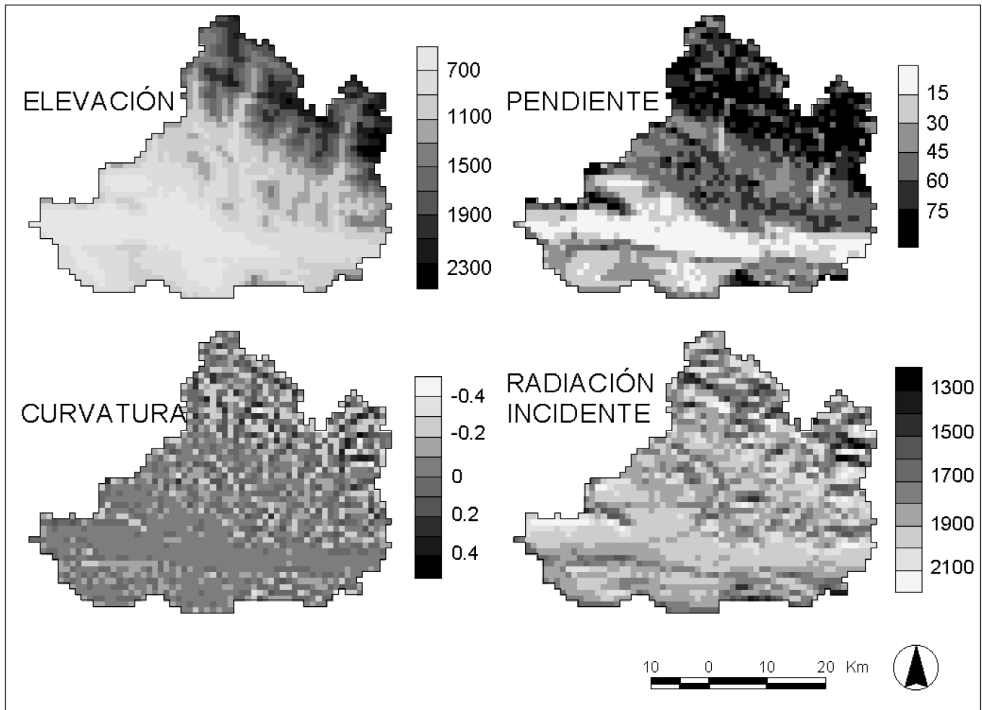


Figura 2. Factores topográficos. Elevación (datos en metros). Pendiente (datos en porcentajes). Curvatura (). Radiación solar incidente media anual ($\text{Kj m}^{-2} \text{sg}^{-1} \text{día}$).

que las relaciones no tienen por qué ser necesariamente lineales (Lanzante, 1996). Se calcularon también los coeficientes de variación en cada una de las estaciones del año. Los análisis se han desagregado por cubiertas vegetales.

IV. RESULTADOS

1. Distribución espacial de la actividad y variabilidad interanual estacional de la vegetación

En la figura 4 se muestra la distribución de los valores promedio de NDVI a lo largo de las 4 estaciones del año. Se observan importantes contrastes espaciales en cada estación y entre las 4 estaciones. En invierno los valores de NDVI son muy bajos en todo el área de estudio, aspecto propiciado por las bajas temperaturas que limitan la actividad vegetal. En ningún caso se registran valores por encima de 0.5. Sin embargo, se producen contrastes espaciales muy significativos. Lo más llamativo es la amplia área con valores de NDVI = 0, que aparece en el sector más septentrional de la cuenca. Se trata de los espacios de mayor elevación y en los que la actividad de la vegetación se ve paralizada como consecuencia de la cubierta nival que la cubre. En el fondo del valle del río Aragón también se registran valores

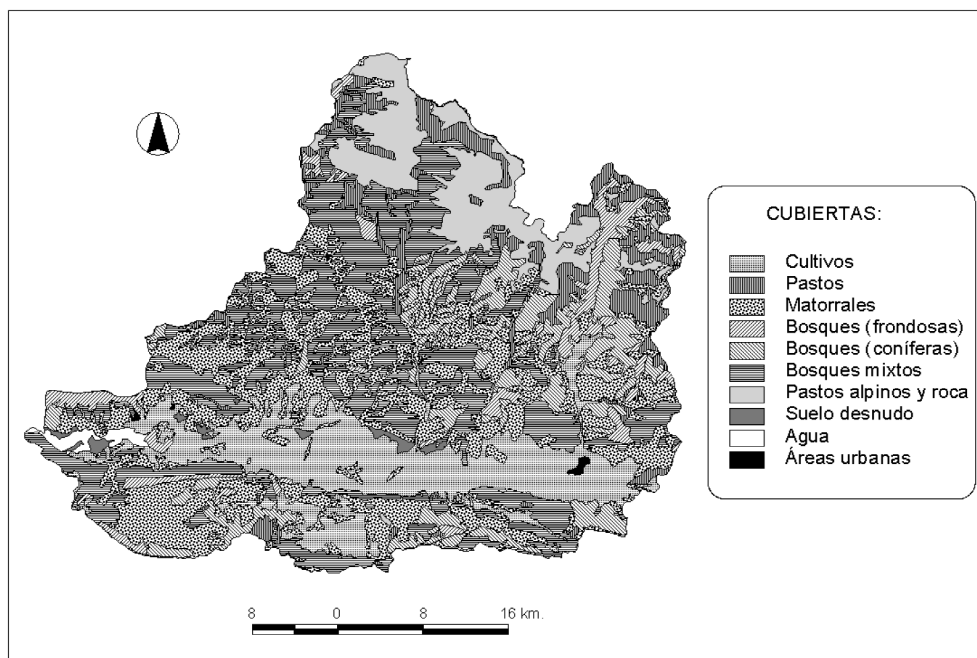


Figura 3. Mapa de cubiertas del suelo de la cuenca alta del río Aragón.

bajos de NDVI, coincidiendo con espacios de escasa actividad vegetal en esos momentos, como los campos de cultivo o las áreas de suelo desnudo (cárcavas, fundamentalmente). En cambio, los valores más altos se registran en las áreas de matorrales y bosques de coníferas que presentan una moderada actividad en invierno.

En primavera todavía permanecen amplias áreas cubiertas por la nieve, aunque su extensión superficial es inferior a la invernal (311 km² frente a 382 km²). En las áreas no cubiertas se produce un incremento generalizado de la actividad vegetal. Aparecen espacios con valores de NDVI superiores a 0.6, coincidiendo con las áreas de cultivos en los fondos de valle de los ríos Aragón, Aragón Subordán y Veral. El resto del territorio, exceptuando el cubierto de nieve, posee valores superiores a 0.4, lo que indica un aumento significativo de la actividad y producción vegetal respecto a la estación invernal.

En verano, la distribución espacial de los valores de NDVI varía considerablemente respecto a la estación primaveral. Se produce una clara gradación espacial N-S. Los espacios más productivos se localizan ahora en el sector más septentrional de la cuenca, coincidiendo con las áreas de pastos supraforestales (subalpinos, principalmente) y bosques de caducifolios. Las laderas medias, colonizadas por matorrales y pinares desde el cese de las actividades económicas tradicionales, presentan valores más bajos (alrededor de 0.55), aunque muy superiores a los de los fondos planos más amplios de la Depresión Media, que eran las áreas más productivas y de mayor actividad vegetal en primavera.

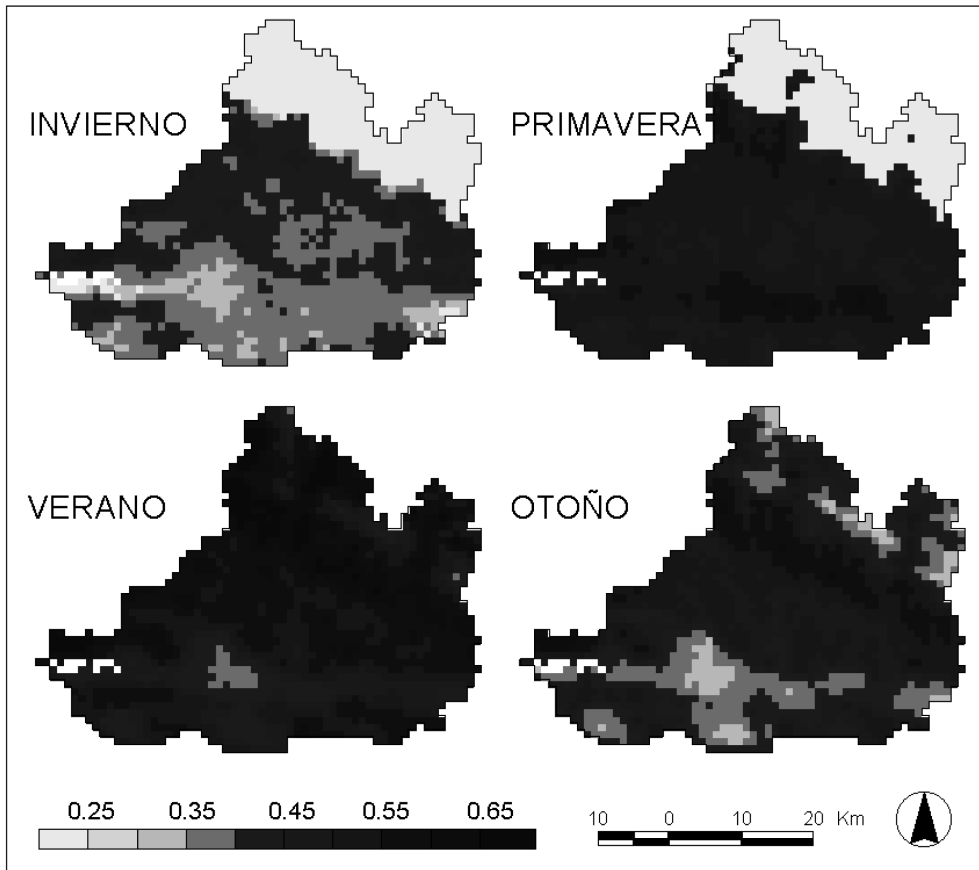


Figura 4. Evolución estacional de los valores promedio de NDVI.

En otoño se asiste a un descenso generalizado de la actividad y de la producción de biomasa. Los espacios que se mantienen como más productivos son las áreas de contacto entre bosques y pastos supraforestales. Se observa también que el descenso en los valores de NDVI es inferior en las áreas colonizadas por bosques de coníferas y matorrales que en los bosques de caducifolios, en los que se asiste a un paro biológico que contrasta con el mantenimiento de la actividad en los bosques y matorrales localizados a menor altitud (*Pinus sylvestris*, *Buxus sempervirens*, *Echinopartum horridum*).

En la figura 5 se indica la distribución espacial y estacional del coeficiente de variación interanual del NDVI. A las áreas clasificadas como cubierta nival en invierno se les ha asignado un valor 0. En dicha estación, los valores más altos se distribuyen de forma muy dispersa en el espacio, si bien tienden a concentrarse en las áreas más septentrionales, donde se establecen grandes contrastes interanuales en la cubierta de nieve. En primavera tampoco se

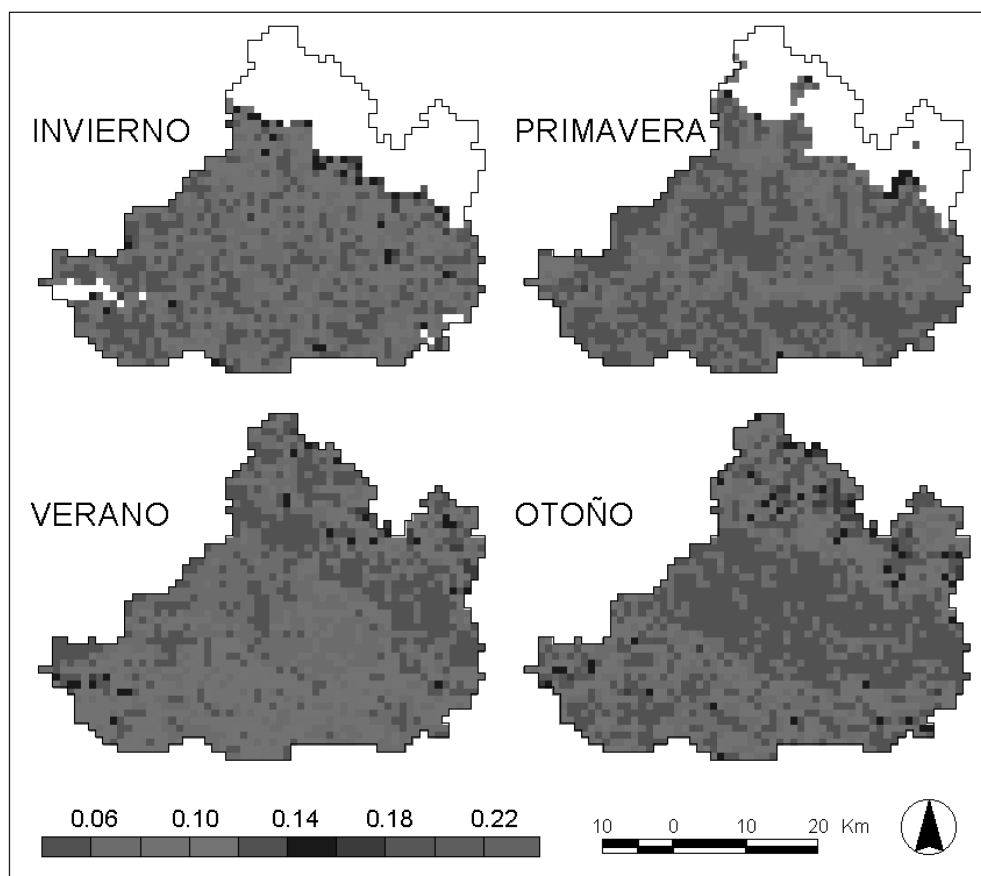


Figura 5. Distribución espacial de los coeficientes de variación estacionales de las series de NDVI.

observan diferencias espaciales significativas, con bajos valores de variabilidad en todo el área de estudio. Por el contrario, en verano y en otoño las diferencias en los valores de NDVI son muy claras, intuyéndose una organización espacial. En la estación estival la mayor variabilidad interanual se registra en la Depresión Media. Las áreas de bosques y matorrales de colonización reciente presentan menores coeficientes de variación, aunque superiores a los de bosques de coníferas y de caducifolios. Son éstos bosques bien estructurados, localizados a mayor altitud y en áreas de condiciones bioclimáticas adecuadas para su desarrollo. Además, se trata de zonas más húmedas y de variabilidad pluviométrica interanual inferior. Durante el otoño hay una escasa variabilidad interanual en las áreas de bosques y matorrales más septentrionales, siendo muy superior en las áreas llanas de menor elevación (campos de cultivo, pastizales y matorrales de sucesión) y en los pastos supraforestales, donde las nevadas tempranas acortan la actividad y la producción vegetal algunos años.

2. Influencia del relieve en la actividad estacional de la vegetación

La tabla 1 muestra las correlaciones entre los valores estacionales de NDVI y las variables topográficas. Llama inicialmente la atención el escaso peso de la curvatura, con sólo una relación significativa, de valor muy bajo, en otoño. La radiación solar incidente parece desempeñar un papel más destacado, aunque mucho menor que la elevación y la pendiente, que aportan los valores más altos. Estos dos últimos factores presentan un comportamiento estacional similar, con una relación directa en verano, otoño e invierno, e inversa durante la primavera.

Tabla 1
CORRELACIÓN (RHO – SPEARMAN) ENTRE LOS VALORES DE NDVI PROMEDIO EN CADA UNA DE LAS ESTACIONES DEL AÑO Y LOS DIFERENTES FACTORES TOPOGRÁFICOS CONSIDERADOS. ** CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.01$), * CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.05$).

Estaciones	Elevación	Curvatura	Pendiente	Radiación solar incidente
Invierno	0.41**	-0.01	0.47**	0.16**
Primavera	-0.20**	0.02	-0.16**	0.14**
Verano	0.50**	0.00	0.57**	-0.07**
Otoño	0.23**	0.07**	0.37**	0.09**

Las figuras 6 a 9 dibujan los diagramas de dispersión entre los valores estacionales de NDVI y las variables topográficas. En la figura dedicada a la elevación se observan dos comportamientos anuales: en invierno y primavera aparecen nubes de puntos con alta dispersión, donde resulta complicado establecer una tendencia clara. Por el contrario, en verano y otoño se aprecia que los puntos se organizan en una curva que dibuja una parábola, cuyo vértice se alcanza a los 1600 m, aproximadamente, en verano y a los 1300-1400 m en otoño. Ello significa que durante la segunda mitad del año la altitud presenta un comportamiento positivo en la producción de NDVI hasta alcanzar una cota, a partir de la cual resulta negativa.

La figura 7 muestra los diagramas de dispersión que relacionan la pendiente con los valores estacionales de NDVI. Las relaciones son parecidas a las establecidas con la elevación, con bajas correlaciones en invierno (positiva) y primavera (negativa). En verano y otoño se aprecia un incremento lineal del NDVI, paralelo a la pendiente hasta valores cercanos al 60 %, desnivel que marca la estabilización de los valores de NDVI.

En las figuras 8 y 9 se observa que la curvatura y radiación solar incidente tienen menos peso que las dos variables anteriores a la hora de explicar los patrones estacionales de NDVI.

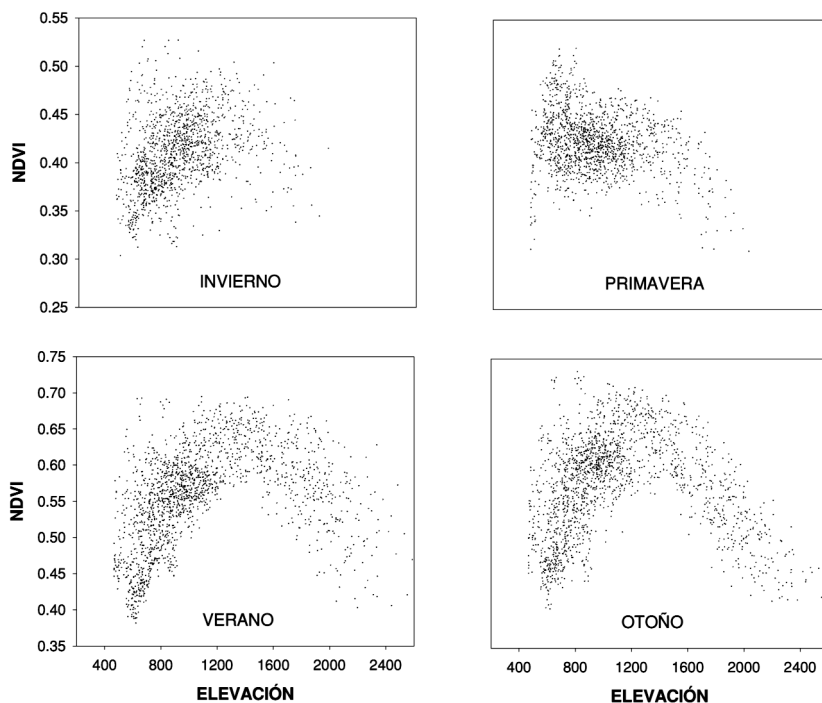


Figura 6. Relación estacional entre los valores de NDVI y la elevación.

3. Influencia de las variables topográficas en la actividad estacional de diferentes cubiertas vegetales

La influencia estacional de los factores topográficos debe ser matizada en función de las comunidades vegetales presentes en el área de estudio, ya que por necesidades fisiológicas la respuesta a los condicionantes topográficos puede ser muy variable (Vicente-Serrano *et al.*, en prensa).

La tabla 2 incluye los valores de correlación entre los NDVIs y las variables topográficas durante la estación invernal. La radiación solar parece ser el factor más importante, ya que presenta el mayor número de correlaciones significativas. Tanto las áreas de cultivos como los diferentes tipos de cubierta boscosa y los matorrales tienen en invierno mayor actividad vegetal en las áreas que reciban mayor radiación solar. La elevación únicamente presenta correlaciones positivas y significativas en los cultivos de secano, bosques mixtos y matorrales, mientras que la pendiente y la orientación registran un número inferior de correlaciones significativas.

En primavera (Tabla 3) el número de correlaciones significativas es inferior al de la estación invernal. Únicamente los bosques de frondosas, coníferas y matorrales presentan correlaciones positivas y estadísticamente significativas con la radiación solar incidente. Las

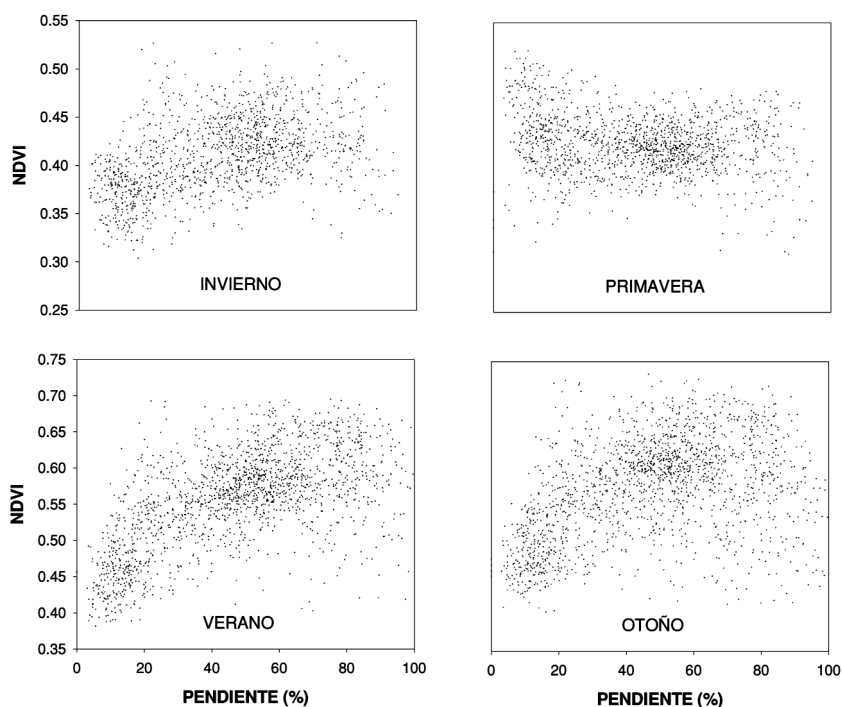


Figura 7. Relación estacional entre los valores de NDVI y la pendiente.

Tabla 2

CORRELACIÓN (RHO – SPEARMAN) ENTRE LOS VALORES DE NDVI PROMEDIO DE INVIERNO EN CADA UNA DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO Y LOS DIFERENTES FACTORES TOPOGRÁFICOS CONSIDERADOS. ** CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.01$),
* CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.05$).

Cubiertas del suelo	Elevación	Curvatura	Pendiente	Radiación solar incidente
Cultivos de secoano	0.22**	0.13*	0.06	0.52**
Cultivos de regadío	0.14	-0.09	-0.22	-0.07
Bosques de frondosas	0.18	0.02	0.12	0.56**
Bosques de coníferas	0.08	0.01	0.09	0.44**
Bosques mixtos	0.14*	0.00	0.13*	0.29**
Matorrales	0.36**	0.02	0.43**	0.37**
Pastos supraforestales	-0.13	0.46**	-0.01	0.01
Cantiles y pastos alpinos	0.44	0.08	0.47	0.45

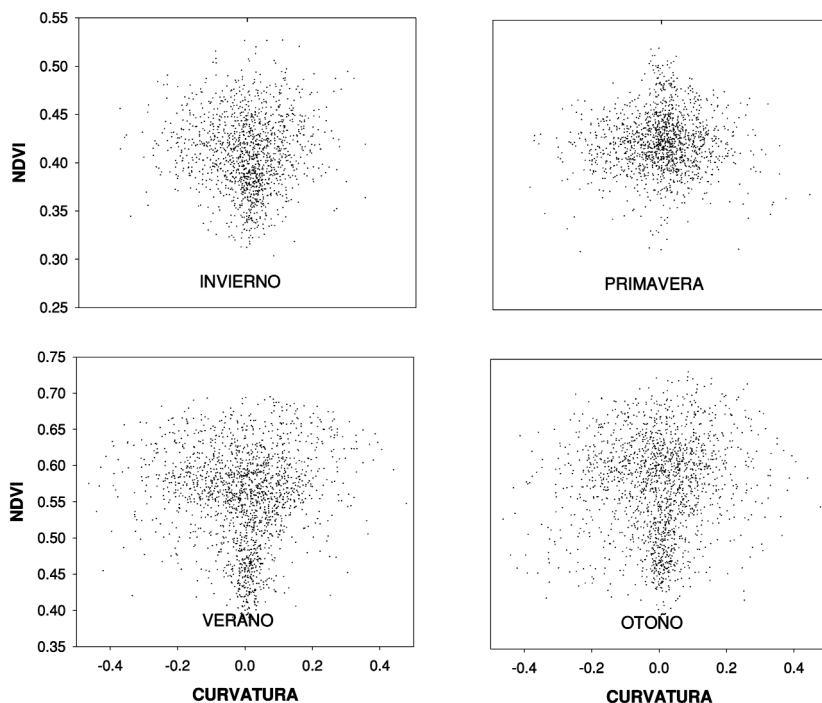


Figura 8. Relación estacional entre los valores de NDVI y la curvatura.

Tabla 3

CORRELACIÓN (RHO – SPEARMAN) ENTRE LOS VALORES DE NDVI PROMEDIO DE PRIMAVERA EN CADA UNA DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO Y LOS DIFERENTES FACTORES TOPOGRÁFICOS CONSIDERADOS. ** CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.01$),
* CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.05$).

Cubiertas del suelo	Elevación	Curvatura	Pendiente	Radiación solar incidente
Cultivos de secano	0.09	-0.17*	-0.33**	0.04
Cultivos de regadío	-0.29	-0.23	-0.50*	0.06
Bosques de frondosas	-0.38**	0.05	-0.12	0.43**
Bosques de coníferas	-0.01	-0.02	0.05	0.16*
Bosques mixtos	-0.11*	0.01	-0.05	0.09
Matorrales	-0.04	0.00	0.18**	0.23**
Pastos supraforestales	-0.72**	0.37*	-0.64**	0.07
Cantiles y pastos alpinos	-0.22	0.19	-0.16	0.51*

correlaciones con la pendiente y la elevación son, mayoritariamente, negativas, mientras que con la curvatura apenas hay correlaciones significativas.

La elevación y la pendiente parecen factores más determinantes durante el verano (Tabla 4), incidiendo de forma positiva en todas las cubiertas salvo en las localizadas a mayor altitud (pastos supraforestales y cantiles), donde la actividad disminuye a medida que se incrementa la altitud y el desnivel. La radiación solar interviene en las cubiertas vegetales en menor medida que la altitud y la pendiente, aunque a grandes rasgos mantiene el mismo signo. Lo más destacable, no obstante, es la relación negativa con los cultivos de regadío, lo que no tiene una explicación fácil, ya que sería esperable mayor actividad de este uso sin limitaciones de humedad edáfica. La curvatura, al igual que en el resto de estaciones, no presenta influencias significativas a la escala espacial de análisis empleada en este trabajo.

En otoño (Tabla 5) las variables pendiente y elevación pierden importancia respecto al verano, mientras la radiación solar la incrementa, actuando de forma positiva sobre bosques, matorrales y cultivos de secano, y de forma negativa sobre los cultivos de regadío.

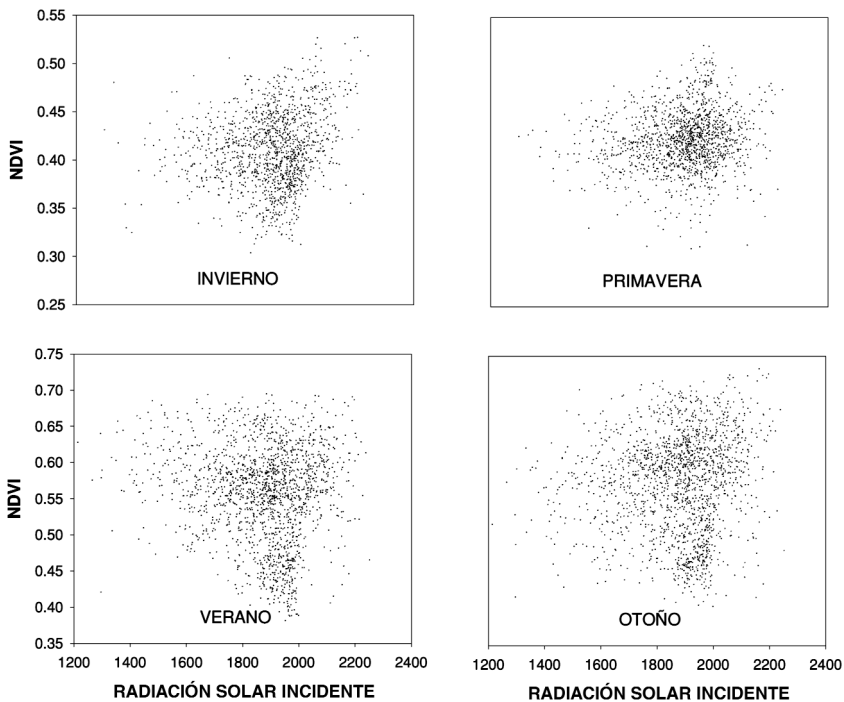


Figura 9. Relación estacional entre los valores de NDVI y la radiación solar incidente.

Tabla 4

CORRELACIÓN (RHO – SPEARMAN) ENTRE LOS VALORES DE NDVI PROMEDIO DE VERANO EN CADA UNA DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO Y LOS DIFERENTES FACTORES TOPOGRÁFICOS CONSIDERADOS. ** CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.01$), * CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.05$).

Cubiertas del suelo	Elevación	Curvatura	Pendiente	Radiación solar incidente
Cultivos de secano	0.47**	0.26**	0.53**	0.24**
Cultivos de regadío	0.53*	0.01	0.39	-0.41
Bosques de frondosas	0.05	0.18	0.27*	0.18
Bosques de coníferas	0.41**	-0.09	0.38**	0.21**
Bosques mixtos	0.63**	0.03	0.56**	0.14**
Matorrales	0.44**	0.00	0.50**	0.34**
Pastos supraforestales	-0.48**	0.17	-0.08	-0.18*
Cantiles y pastos alpinos	-0.42**	-0.06	-0.04	-0.21**

Tabla 5

CORRELACIÓN (RHO – SPEARMAN) ENTRE LOS VALORES DE NDVI PROMEDIO DE OTOÑO EN CADA UNA DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO Y LOS DIFERENTES FACTORES TOPOGRÁFICOS CONSIDERADOS. ** CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.01$), * CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.05$).

Cubiertas del suelo	Elevación	Curvatura	Pendiente	Radiación solar incidente
Cultivos de secano	0.33**	0.23**	0.40**	0.34**
Cultivos de regadío	0.51*	-0.10	0.37**	-0.42*
Bosques de frondosas	-0.26*	0.07	0.02	0.44**
Bosques de coníferas	0.21*	0.05	0.17*	0.43**
Bosques mixtos	0.44**	0.05	0.40**	0.32**
Matorrales	0.48**	0.05	0.54**	0.32**
Pastos supraforestales	-0.71**	0.22	-0.23*	-0.07
Cantiles y pastos alpinos	-0.63**	0.03	-0.12	0.18*

4. Influencia de la topografía en la variabilidad estacional interanual

La tabla 6 anota las correlaciones (Rho-Spearman) entre los valores totales del coeficiente de variación temporal (CV) de los índices de vegetación y los de las variables topográficas consideradas. Una vez más se observa que la elevación y la pendiente tienen el mismo comportamiento, aportando las correlaciones más elevadas e idéntico signo en todas las estaciones. En invierno, otoño y primavera los valores son positivos, mientras que en verano son negativos. Ello significa que el incremento de la altitud y la pendiente representa mayores variaciones interanuales en la actividad vegetal del otoño a la primavera, pero no en verano, cuando ambas variables parecen amortiguar los cambios en la cubierta vegetal. La curvatura y la radiación solar influyen en menor medida.

Para la variable más influyente (la elevación) se han elaborado los diagramas de dispersión (Figura 10). Se observa que en invierno la relación es claramente lineal, de forma que a mayor altitud mayor coeficiente de variación. En primavera la relación parece exponencial, ya que en las cotas más bajas (hasta los 1300 m. aproximadamente) la altitud parece poco determinante en el coeficiente de variación interanual, pero sí lo es a partir de dicha cota. En verano el descenso de los valores del coeficiente de variación tiene lugar hasta los 1300-1500 metros, elevación a partir de la cual se incrementan. Ello nos indica altas variabilidades en altitudes bajas (sujetas a los cambios interanuales de humedad) y altas (factores de carácter térmico). En otoño se desdibuja la relación del verano, dando lugar a una nube de puntos de escasa organización.

Tabla 6

CORRELACIÓN (RHO – SPEARMAN) ENTRE LOS COEFICIENTES DE VARIACIÓN DEL NDVI ESTACIONAL EN CADA UNA DE LAS ESTACIONES DEL AÑO Y LOS DIFERENTES FACTORES TOPOGRÁFICOS CONSIDERADOS. ** CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.01$),
* CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.05$).

Estaciones	Elevación	Curvatura	Pendiente	Radiación solar incidente
Invierno	0.40**	-0.03	0.37**	-0.19**
Primavera	0.13**	0.02	0.10**	0.09**
Verano	-0.26**	0.03	-0.34**	0.05
Otoño	0.16**	-0.07*	0.11**	-0.16**

5. Influencia de la topografía en la variabilidad estacional interanual en diferentes cubiertas

La tabla 7 incluye los resultados (correlaciones Rho-Spearman) entre los valores de coeficiente de variación de las cubiertas vegetales y las variables topográficas durante la estación invernical. La elevación y la pendiente son las variables más influyentes, estableciendo una relación directa entre la vegetación y ambos parámetros topográficos. La curvatura no influye

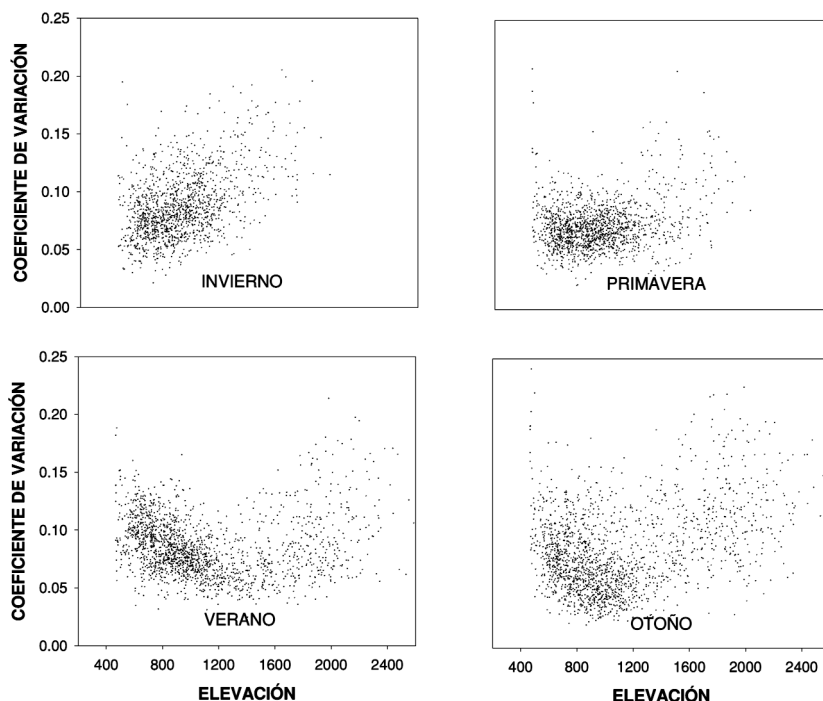


Figura 10. Distribución estacional del coeficiente de variación estacional de los valores de NDVI en función de la elevación.

significativamente en ninguna de las cubiertas. La radiación solar incidente muestra menor número de correlaciones estadísticamente significativas, predominando las inversas, lo que indica que durante el invierno las áreas que reciben mayor radiación solar tienen menor variabilidad interanual en los valores de NDVI.

En primavera (Tabla 8) los factores topográficos pierden influencia a la hora de explicar el coeficiente de variación del NDVI, siendo los pastos supraforestales los más sensibles a la elevación y la pendiente. Los bosques mixtos también guardan relación con la elevación y la radiación solar.

En verano (Tabla 9) las relaciones vuelven a ser más estrechas y significativas, fundamentalmente con la elevación y la pendiente. Estas ejercen influencias de distinto signo: Los cultivos de secano, bosques de coníferas, bosques mixtos y matorrales presentan correlaciones negativas, mientras que los bosques de frondosas, pastos supraforestales y las áreas de cantiles muestran correlaciones positivas. La curvatura no da correlaciones significativas, y la radiación solar incidente únicamente influye (con signo negativo) en los bosques de frondosas.

Finalmente, la tabla 10 incluye las correlaciones para la estación otoñal. El papel de la elevación y la pendiente es menor respecto al periodo estival, mientras que es mayor el de la

Tabla 7

CORRELACIÓN (RHO – SPEARMAN) ENTRE LOS VALORES DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN INVERNAL DE NDVI EN CADA UNA DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO Y LOS DIFERENTES FACTORES TOPOGRÁFICOS CONSIDERADOS. ** CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.01$), * CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.05$).

Cubiertas del suelo	Elevación	Curvatura	Pendiente	Radiación solar incidente
Cultivos de secano	0.16*	-0.02	0.11	-0.16*
Cultivos de regadío	-0.09	0.13	0.25	-0.22
Bosques de frondosas	0.40**	0.11	0.43**	-0.32*
Bosques de coníferas	0.49**	-0.06	0.41**	0.02
Bosques mixtos	0.31**	-0.02	0.31**	-0.11*
Matorrales	0.32**	0.03	0.23**	-0.07
Pastos supraforestales	0.65**	-0.29	0.66**	0.02
Cantiles y pastos alpinos	0.42	-0.21	0.61	-0.19

Tabla 8

CORRELACIÓN (RHO – SPEARMAN) ENTRE LOS VALORES DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN PRIMAVERAL DE NDVI EN CADA UNA DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO Y LOS DIFERENTES FACTORES TOPOGRÁFICOS CONSIDERADOS. ** CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.01$), * CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.05$).

Cubiertas del suelo	Elevación	Curvatura	Pendiente	Radiación solar incidente
Cultivos de secano	-0.11	0.08	0.04	0.08
Cultivos de regadío	-0.03	0.18	0.22	0.41
Bosques de frondosas	0.18	0.21	0.23	0.02
Bosques de coníferas	0.09	0.06	0.08	0.20*
Bosques mixtos	0.20**	-0.02	0.12*	0.17**
Matorrales	0.11*	-0.02	0.03	0.00
Pastos supraforestales	0.62**	0.04	0.61**	-0.14
Cantiles y pastos alpinos	-0.33	0.47	-0.41	-0.24

Tabla 9

CORRELACIÓN (RHO – SPEARMAN) ENTRE LOS VALORES DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN ESTIVAL DE NDVI EN CADA UNA DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO Y LOS DIFERENTES FACTORES TOPOGRÁFICOS CONSIDERADOS. ** CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.01$), * CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.05$).

Cubiertas del suelo	Elevación	Curvatura	Pendiente	Radiación solar incidente
Cultivos de secano	-0.14*	-0.12	-0.18*	0.09
Cultivos de regadío	-0.10	0.27	-0.22	0.23
Bosques de frondosas	0.26*	0.09	0.13	-0.36**
Bosques de coníferas	-0.31**	-0.01	-0.29**	-0.11
Bosques mixtos	-0.40**	0.02	-0.37**	-0.04
Matorrales	-0.33**	0.03	-0.46**	-0.10
Pastos supraforestales	0.39**	-0.06	0.06	0.17
Cantiles y pastos alpinos	0.37**	0.05	0.02	0.02

Tabla 10

CORRELACIÓN (RHO – SPEARMAN) ENTRE LOS VALORES DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN OTOÑAL DE NDVI EN CADA UNA DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO Y LOS DIFERENTES FACTORES TOPOGRÁFICOS CONSIDERADOS. ** CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.01$), * CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($P < 0.05$).

Cubiertas del suelo	Elevación	Curvatura	Pendiente	Radiación solar incidente
Cultivos de secano	-0.18**	-0.09	-0.20**	0.03
Cultivos de regadío	-0.15	-0.13	-0.14	0.08
Bosques de frondosas	0.25*	-0.10	0.36**	-0.17
Bosques de coníferas	0.20**	-0.08	0.24**	-0.35**
Bosques mixtos	0.04	0.00	0.08	-0.21**
Matorrales	-0.32**	-0.05	-0.32**	-0.09
Pastos supraforestales	0.41**	-0.24*	0.30**	0.00
Cantiles y pastos alpinos	0.16*	0.02	0.07	-0.41**

radiación solar incidente. La curvatura tampoco ejerce demasiada influencia en dicha estación. Como siempre la elevación y la pendiente presentan los mismos signos, que son negativos para los usos agrícolas y matorrales (los localizados a menor altitud) y positivos para bosques y pastos supraforestales, usos estos últimos que se ven perjudicados por el incremento de la radiación solar incidente.

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado, en un amplia área del Pirineo occidental aragonés, la influencia estacional de la topografía en los valores promedio de NDVI y en su variabilidad interanual. Se ha comprobado que las variables topográficas ejercen un papel destacado, que varía estacionalmente en función de los tipos de cubierta vegetal. Así, a la escala de análisis utilizada en este estudio, se ha puesto de relieve que la curvatura del terreno tiene menor influencia, tanto en los promedios como en los coeficientes de variación del NDVI, que las otras tres variables consideradas: elevación, pendiente y radiación solar incidente. Se ha comprobado también que la elevación y la pendiente presentan un comportamiento muy parecido, quizá como consecuencia de la baja resolución espacial empleada (1 km²), que hace que ambas variables estén íntimamente relacionadas ($Rho = 0.83$). Consideramos que la elevación es el factor más determinante, ya que en ámbitos montañosos controla más que la pendiente las condiciones térmicas, y consecuentemente los procesos biológicos de la vegetación.

Entre los resultados obtenidos destaca el importante papel de la radiación solar incidente en invierno y primavera, también —aunque algo menor— en otoño. La elevación y la pendiente, por su parte, apenas condicionan la actividad vegetal en invierno, pero resultan decisivas durante el resto del año. En primavera ejercen un efecto negativo, de forma que el incremento de la altitud y el desnivel implica el descenso de los valores de NDVI. Sin embargo, en verano y otoño su relación es directa, mostrando mayor actividad vegetal en las cotas más elevadas. Ello nos lleva a señalar el destacado papel que ejerce la temperatura en estos ambientes de montaña, donde la humedad no es un factor limitante salvo en el estío y en enclaves muy concretos. Durante las dos estaciones más frías (invierno y primavera) son las áreas más cálidas las que presentan mayor actividad vegetal, mientras que en verano y otoño se ven beneficiadas las más frescas, ya que la excesiva insolación o las altas temperaturas parecen ralentizar, e incluso en algunos casos paralizar, la actividad vegetal. De todas las formas las diferencias altitudinales entre las cotas extremas son tan altas (alrededor de 2400 m) que a partir de los 1600 m aproximadamente, coincidiendo con el nivel más bajo de los pastos supraforestales, el incremento de altitud resulta negativo —incluso en verano— para la producción vegetal. El fuerte descenso de las temperaturas nocturnas es un handicap importante para los pastos alpinos.

La elevación también determina que los coeficientes de variación sean mayores en invierno, primavera y otoño, y más bajos en verano, mostrando que las áreas localizadas a menor altitud son más estables a escala interanual, en relación con unas fluctuaciones más bajas de las temperaturas. No obstante, hay que señalar que en verano y otoño las relaciones no son lineales ni en el caso de los promedios ni de los coeficientes de variación, dándose unos máximos de producción entre 1300 y 1600 metros, coincidiendo con mínimos en el CV, aspecto —en definitiva— que pone de manifiesto que las cubiertas más activas y más estables interanualmente se ubican entre 1300 y 1600 metros de altitud.

El patrón de distribución espacial de producción de NDVI establece franjas o pisos en las distintas estaciones del año. Las laderas bajas, cubiertas fundamentalmente por campos abandonados (Lasanta, 1988), y algunos enclaves muy abrigados son las áreas más productivas en primavera e invierno, respectivamente. En verano el óptimo productivo se desplaza a las altitudes bajas del piso supraforestal (entre los 1600 y 2000 m), coincidiendo con los pastos creados históricamente por la deforestación del nivel superior del bosque (Montserrat, 1992; García-Ruiz y Valero, 1998). En otoño, la franja más productiva se localiza en un nivel inmediatamente inferior al anterior (entre 1300 y 1600 m), en el contacto entre los bosques y pastos supraforestales. Por otro lado, este piso es el más estable interanualmente, al alejarse de los fondos de valle, con frecuencia afectados por procesos de inversión térmica (Puigdefábregas, 1977), y de las cotas altas, donde las condiciones climáticas son más extremas (Creus, 1987) y los diferentes tipos de cubierta tienen ciclos fenológicos más cortos (Remón, 1997), por lo que cualquier incidencia climática es determinante en su desarrollo.

Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ayudar a tomar decisiones en la gestión del territorio. Así, por ejemplo, son muy interesantes para trazar itinerarios de pastoreo a lo largo del año o para recuperar antiguos campos de cultivo como prados de siega o diente, en un intento por disminuir el desequilibrio estacional de pastos (Ferrer, 1988). En este sentido, constituye una línea de trabajo a tener en cuenta, incluyendo también estudios de mayor resolución espacial, lo que permitirá conocer mejor el papel de variables como la curvatura del terreno y la exposición que posiblemente quedan ocultas por la altitud cuando se utiliza una escala pequeña.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo de los proyectos de investigación: *Efectos erosivos del fuego a lo largo de un gradiente climático. Aportaciones para la gestión de áreas quemadas* (REN2002-00133/GLO), *Caracterización espacio-temporal de las sequías en el valle medio del Ebro e identificación de sus impactos* (BSO2002-02743), y *Variabilidad climática y dinámica forestal en ecosistemas de ecotono* (REN2003-07453) financiados por la CICYT y FEDER, y por el «Programa de grupos de investigación consolidados» (BOA 147 of 18-12-2002), financiado por el Gobierno de Aragón.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- CARLSON, T.N., y RIPLEY, D.A. (1997): On the relation between NDVI, fractional vegetation cover and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62: 241-252.
- CHAUVELIER, F. (1987): *Reboisements et aménagement de l'espace: l'exemple de la province de Huesca (Espagne)*. Tesis doctoral. Universidad de Burdeos.
- CHE (2002): Confederación Hidrográfica del Ebro. Mapa de cubierta del suelo. <http://oph.chebro.es/ContenidoCartoApoyo.htm#suelos>.
- CREUS, J. (1987): Algunas características climáticas de la alta montaña en los Pirineos centrales. *Actas del X Congreso Nacional de Geografía*: 137-146, Zaragoza.
- DELGADO, J. (1991): *Clasificación y análisis de nubes mediante imágenes Meteosat*. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid.

- DIALLO, O., DIOUF, A., HANAN, N. P., NDIAYE, A. y PRÉVOST, Y. (1991): AVHRR monitoring of savana primary production in Senegal, West Africa: 1987-1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12 (6): 1259-1279.
- DUCHEMIN, B., GOUBIER, J. y COURRIER, G. (1999): Monitoring phenological key stages and cycle duration of temperate deciduous forest ecosystems with NOAA/AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 67: 68-82.
- FANG, J., PIAO, S., TANG, Z., PENG, CH. Y. JI., W. (2001): Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science*, 293: 1723-1724.
- FERRER, C. (1988): Los recursos pascícolas del Pirineo Aragonés. *Actas de la XXVIII Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos*: 25-63.
- FLORINSKY, I.V. y KURYAKOVA, G.A. (1996): Influence of topography on some vegetation cover properties. *Catena*, 27: 123-141.
- GARCÍA-RUIZ, J. M. (1988): La evolución de la agricultura de montaña y sus efectos sobre la dinámica del paisaje. *Revista de Estudios Agro-Sociales*, 146: 7-37.
- GARCÍA-RUIZ, J. M. y PUIGDEFÁBREGAS, J. (1982): Formas de erosión en el flysch eoceno surpirenaico. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 8: 85-128.
- GARCÍA-RUIZ, J. M., PUIGDEFÁBREGAS, J. y CREUS, J. (1985): *Los recursos hídricos superficiales del Alto Aragón*. Colección de Estudios Altoaragoneses, 2: 224 pp., Huesca.
- GARCÍA RUIZ, J. M. y VALERO, B. (1998): Historical geomorphic processes and human activities in the Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*. 18: 309-320.
- GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C. (1992): *Pautas espaciales de la erosión hídrica en el semirrido aragonés: exposición topográfica y cubierta vegetal*. Tesis Doctoral. Inédita. Universidad de Zaragoza. 375 pp., Zaragoza.
- HOLBEN, B.N., (1986): Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1417-1434.
- ILLERA, P., DELGADO, R. y CALLE, A. (1995): A navigation algorithm for satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 577-588.
- KENNEDY, P. J. (1989): Monitoring the phenology of Tunisian grazing lands. *International Journal of Remote Sensing*, 10: 835-845.
- LANZANTE, J. R. (1996): Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: theory and examples including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatolog*, 16: 1197-1226.
- LASANTA, T. (1988): The process of desertion of cultivated areas in the Central Spanish Pyrenees. *Pirineos*, 132: 15-36.
- LASANTA, T. (1989): *Evolución reciente de la agricultura de montaña*. Geoforma Ediciones. Logroño. 220 pp.
- LASANTA, T., VICENTE SERRANO, S. M. y CUADRAT, J. M. (2000): Marginación productiva y recuperación de la cubierta vegetal en el Pirineo: un caso de estudio en el valle de Borau. *Boletín de la AGE*, 29: 5-28.
- MONTSERRAT, P. (1971): El ambiente vegetal jacetano. *Pirineos*, 101: 5-22.
- MONTSERRAT, J. (1992): *Evolución glacial y postglacial del clima y la vegetación en la vertiente sur del Pirineo: Estudio palinológico*. Instituto Pirenaico de Ecología, 147 pp. Zaragoza.

- MONTSERRAT, P., MONTSERRAT, J. M. y MONTSERRAT, G. (1984): Estudio de las comunidades de *Echinopartum horridum* en el Pirineo español. *Acta Biologica Montana*, 4: 249-257.
- NICHOLSON, S. E., DAVENPORT, M. L. y MALO, A. R. (1990): A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA-AVHRR. *Climatic Change*, 17: 209-241.
- NICHOLSON, S. E. y FARRAR, T. J. (1994): The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. *Remote Sensing of Environmen*, 50: 107-120.
- PARUELO, J. M. y LAUENROTH, W.K. (1998): Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography*, 25: 721-733.
- PONS, X. (1997): Estimación de la radiación solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica. *VIII Coloquio de Geografía Cuantitativa*: 87-97, Vitoria.
- PONS, X., (1998): *Manual of Miramon. Geographic Information System and Remote Sensing Software*. (<http://www.creaf.uab.es/miramon>). Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF): Bellaterra; 150.
- PUIGDEFÁBREGAS, J. (1970): Características de la inversión térmica en el extremo oriental de la Depresión Interior Altoaragonés. *Pirineos*, 96: 21-50.
- REMÓN, J. L. (1997): Estructura y producción de pastos en el Alto Pirineo Occidental. Tesis Doctoral. Universidad de Navarra.
- SCHULTZ, P. A. y HALPERT, M. S. (1995): Global analysis of the relationships among a vegetation index, precipitation and land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 16: 2755-2777.
- SOLER, M. y PUIGDEFÁBREGAS, C. (1972): Esquema litológico del Alto Aragón Occidental. *Pirineos*, 106: 5-15.
- TOWNSHEND, J. R. G. y JUSTICE, C. O. (1986): Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1435-1445.
- TUCKER, C. J., TOWNSHEND, J. G. R. y GOFF, T. E. (1985): African land-cover classification using satellite data. *Science*, 227: 369-374.
- VICENTE-SERRANO, S. M., LASANTA, T. y ROMO, A. (2003): Variabilidad espacial y diferencias estacionales en la producción vegetal de los usos del suelo en el Pirineo Central español. *Ería*.
- WALTER, H. (1979): Vegetation of the Earth and ecological systems of the Geo-biosphere. *Springer*. Nueva York.
- WYLIE, B. K., MEYER, D. J., TIESZEN, L. L., y MANNEL. S. (2002): Satellite mapping of surface biophysical parameters at the biome scale over the North American grassland. A case study. *Remote Sensing of Environment*, 79: 266-278.
- YANG, L., WYLIE, B. K., TIESZEN, L. L. y REED, B. C. (1998): An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U.S. northern and central Great Plains. *Remote Sensing of Environmen*, 65: 25-37.

